中国生态农业学报 2016 年 6 月 第 24 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2016, 24(6): 801−810

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151209

不同生境对蚂蚁功能群的影响*
——以云南省绿春县为例

卢志兴 陈又清**

(中国林业科学研究院资源昆虫研究所 昆明 650224)

摘 要 为探究土地利用变化主导的生境变化对蚂蚁功能群的影响，采用陷阱法和 Winkler 袋法调查了云南省绿春县天然次生林(N)、桉树林(E)、紫胶林(L)、橡胶林(R)、紫胶–玉米混农林(M)、旱地(D)和农田(F)7 种生境类型的蚂蚁群落。共采集蚂蚁 37 891 头，隶属于 8 亚科 52 属 137 种；依据竞争关系、生境要求、行为优势以及对环境压力和干扰的响应等 4 个生态学特性，将 52 属划分为 7 个功能群：优势臭蚁亚科(DD)、从属弓背蚁族(SC)、广义切叶蚁亚科(GM)、机会主义者(O)、隐蔽物种(C)、气候特化种(CS)和专业捕食者(SP)。不同功能群的物种丰富度排序为机会主义者(10 属 32 种)>气候特化种(15 属 29 种)>广义切叶蚁亚科(3 属 24 种)>隐蔽物种(14 属 21 种)>从属弓背蚁族(2 属 16 种)>专业捕食者(6 属 14 种)>优势臭蚁亚科(2 属 2 种)。从属弓背蚁族、气候特化种、隐蔽物种 3 个功能群的蚂蚁多度在天然次生林、桉树林和紫胶林中所占比例较高，而优势臭蚁亚科功能群则在干扰多的农田中比例较高；除优势臭蚁亚科仅 2 属 2 种外，在天然次生林、桉树林、紫胶林和紫胶–玉米混农林中大多数功能群的蚂蚁物种丰富度明显高于农田，而专业捕食者功能群蚂蚁物种丰富度在不同生境中差异不大。桉树林和紫胶林蚂蚁功能群的群落结构与天然次生林较为接近，橡胶林、紫胶–玉米混农林和旱地蚂蚁功能群的群落结构相似。气候特化种、广义切叶蚁亚科、机会主义者和从属弓背蚁族在不同类型样地中的物种组成变化程度大于同一类型生境重复样地间的变化程度。广义切叶蚁亚科、机会主义者和从属弓背蚁族 3 个功能群的蚂蚁群落在不同生境中变化明显，整体上表现为桉树林、紫胶林和天然次生林的蚂蚁群落与旱地和农田不相似；隐蔽物种和气候特化种仅在桉树林和紫胶林蚂蚁群落较为相似；专业捕食者功能群蚂蚁群落在不同生境中的变化不明显。蚂蚁功能群能够指示生境变化，广义切叶蚁亚科、从属弓背蚁族和机会主义者的指示效果较好，实质上是不同功能群中不同物种的多度及功能群内的群落组成变化对生境变化导致的干扰及资源可利用程度的响应有差异。

关键词 西南山地 蚂蚁功能群 生境变化 人工林 生物指示
中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)06-0801-10

Effects of habitat on ant functional groups: A case study of Lüchun County, Yunnan Province, China*

LU Zhixing, CHEN Youqing**

(Institute of Insect Resources Research, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China)

Abstract In order to explore the effects of habitat change driven by land use change on functional groups of ant, ant communities in secondary natural forests, eucalyptus plantations, lac insect plantations, rubber plantations, lac insect-corn agroforests, drylands and farmlands were investigated by pitfall traps and Winkler in Lüchun County, Yunnan Province. A total of 37 891 individual ants were collected, belonging to 137 species, 52 genera and 8 sub-families of Formicidae. The 52 ant

* 国家自然科学基金项目(31270561, 31470493)资助
** 通讯作者: 陈又清，研究方向为昆虫生态学。E-mail: cyqcaf@126.com
卢志兴，研究方向为昆虫生态学。E-mail: endeavou@163.com
收稿日期: 2015−11−11 接受日期: 2015−12−18
* Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31270561, 31470493)
** Corresponding author, E-mail: endeavou@163.com
Received Nov. 11, 2015; accepted Dec. 18, 2015

genera were divided into 7 functional groups based on competitive interactions, habitat requirements, behavioral dominance, and response to environment stress and disturbance. They were Dominant Dolichoderinae, Subordinate Camponotini, Generalised Myrmicinae, Opportunities, Cryptic Species, Climate Specialists and Specialist Predators. Species richness of different functional groups was in the order of Opportunists (10 genera 32 species) > Climate Specialists (15 genera 29 species) > Generalized Myrmicinae (3 genera 24 species) > Cryptic Species (14 genera 21 species) > Subordinate Camponotini (2 genera 16 species) > Specialist Predators (6 genera 14 species) > Dominant Dolichoderinae (2 genera 2 species). Subordinate Camponotini, Climate Specialists and Cryptic Species had higher abundance in secondary natural forests, eucalyptus plantations and lac insect plantations. Dominant Dolichoderinae had higher abundance in farmlands with high disturbances. Dominant Dolichoderinae had only 2 genera 2 species while most other functional groups had higher species richness in secondary natural forests, eucalyptus plantations, lac insect plantations and lac insect-corn agroforests. There was less difference in species richness of specialist predators among different habitats. Community structures of ant functional groups in eucalyptus plantations and lac insect plantations had high similarities with those in secondary natural forests. The community structures of ant functional groups in rubber plantations and lac insect-corn agroforests had high similarities with those in drylands. Changes in species composition of Climate Specialists, Generalized Myrmicinae, Opportunitists and Subordinate Camponotini among different habitats were larger than those in the other samples. The changes in ant communities of Generalized Myrmicinae, Opportunitists and Subordinate Camponotini were significant in different habitats. This showed that ant communities in eucalyptus plantations, lac insect plantations and secondary natural forests were in high dissimilation with those in drylands and farmlands. Ant communities of Cryptic Species and Climate Specialists in eucalyptus plantations had high similarities with those in lac insect plantations. There were no significant changes in Specialist Predator ant communities among the different habitats. Ant functional groups were good indicators for habitat change, especially Generalized Myrmicinae, Subordinate Camponotini and Opportunitists were better indicators than the other ant functional groups. The most essential attribute was ant abundance, while community compositions within each functional group had different responses to disturbances and changes in available resources with land use change.
Keywords Mountain area, Southwestern China; Ant functional group; Habitat change; Plantation; Bio-indication

土地利用变化是指由于土地自身特性变化及人类个体或群体作用方式变化引起的土地利用方式、覆被和使用程度的变化，是人类活动与自然生态环境相互作用的集中体现[1]。土地利用变化包括将自然景观改变成为人类利用的土地以及在人类主导的土地上改变现有的经营活动，包括清除森林，增加现有土地利用强度等[2]。我国是一个多山国家，山地面积占国土面积的 2/3；其中，西南地区山地面积占土地总面积的 92.6%[3]。山地地貌的特殊性带来了山地生态环境的敏感性和脆弱性，我国西南山地土地利用强度存在增加的趋势。土地利用变化主导的生境变化通常引起物种多样性降低[4−5]。在此过程中驱动生物多样性降低的主要因素是栖境丧失或破坏，植被结构、物种组成等发生变化[6−7]。对于其中的动物类群，则是土地受到不同程度的干扰后，导致资源的可利用程度及生境质量发生变化，进而对动物群落产生影响[8−9]。土地利用变化改变原有景观，形成破碎化的生境斑块，降低生境质量及系统稳定性，加剧物种消失速度，而且导致陆地生态系统的功能发生改变[10−11]。然而，传统的多样性研究只关注测定物种的多样性，即仅仅提供某个物种是否存在以及其多度，除了保护多样性本身，人类保护和管理生态系统是希望保护生态系统提供的服务和功能，其中生态系统的功能必须优先保护。

蚂蚁(Hymenoptera: Formicidae)广泛分布于各种陆地生态系统中，具有重要的生态功能。蚂蚁功能群最早由 Greenslade[12]基于澳大利亚干热区域的研究而提出，随后 Andersen[13−14]根据蚂蚁属级水平上的竞争关系、生境要求、行为优势以及对环境压力及干扰的响应进行修正和完善。通过功能群的划分可以使研究系统的复杂性大大降低，弱化个体在生态系统中的作用，能更好地指示出生物与环境的关系及生态系统变化[13]，具有重要的生物指示价值。研究显示，蚂蚁功能群的多度随着压力和干扰发生显著变化，在大尺度上可以较好地揭示蚂蚁群落沿着生物地理梯度变化的规律及群落动态[13−16]，从而指示环境变化[17]。然而，这些研究并未揭示蚂蚁功能群沿不同植被类型或环境梯度变化的原因。

本研究通过调查云南山地不同生境类型样地的蚂蚁群落，划分蚂蚁功能群，并比较不同生境类型样地中各蚂蚁功能群的多度及其群落结构变化，探讨在局域尺度上划分的蚂蚁功能群能否指示生境变化以及蚂蚁功能群在多度及群落结构层面如何响应生境变化，为今后利用蚂蚁作为指示生物进行生物多样性快速评价提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　样地设置及概况

云南省山地地形复杂, 很难找到或设置某一条件不同而其他条件均一的栖境, 因此, 土地利用变化的样地是在自然背景下综合植被结构、土地利用方式、自然环境因素等所选择的栖境。研究地位于云南省绿春县, 共选取 7 种不同生境类型的样地进行蚂蚁群落调查, 分别为天然次生林(N)、桉树林(E)、紫胶林(L)、橡胶林(R)、紫胶–玉米混农林(M)、旱地(D)和农田(F), 所选取样地的坡度、坡向、土壤条件、气候条件基本一致。每种类型样地各选取 2 块面积大于 1 hm^2 的样地作为重复, 2 块重复样地的植被、郁闭度和枯落物情况基本一致。天然次生林以高大阔叶树种为主, 地面覆盖大量枯落物, 郁闭度 70%左右; 桉树林为 6 年生桉树(*Eucalyptus grandis*), 林下灌木和草本发达, 地表有枯落物, 郁闭度 50%左右; 紫胶林以 6~8 年生南岭黄檀(*Dalbergia balansae*)为主要寄主植物, 林内放养紫胶虫, 林下草本层发达, 有少量干扰, 郁闭度为 50%左右; 橡胶林为约 30 年生橡胶树(*Hevea brasiliensis*), 林内形成固定的割胶路线, 行间空地中分布有小灌木和部分草本, 郁闭度约为 75%, 干扰较高; 紫胶–玉米(*Zea mays*)混农林为紫胶林下种植粮食作物的模式, 紫胶虫寄主植物密度低于紫胶林, 干扰较高, 郁闭度为 40%左右; 旱地为雨季从事粮食生产旱季撂荒的土地, 干扰较大; 农田为利用程度较高的土地, 采样前进行水稻(*Oryza sativa*)种植, 收获后撂荒, 土壤板结, 有少量草本植物, 蚂蚁在田埂中筑巢, 土地干扰程度最大。

1.2　调查方法

于 2012 年 10 月(雨季末期)和 2013 年 4 月(旱季)使用陷阱法和 Winkler 袋法调查了 7 种生境类型各样地地表层、枯落物层和林冠层的蚂蚁群落。地表层: 分别在每个样地设置 15 个陷阱(直径 6 cm, 高度 8 cm 塑料杯), 按照 5×3 网格分布, 陷阱间距 10 m; 林冠层: 选取离陷阱最近的一株乔木, 在树干距离地面 1.5 m 处使用细铁丝固定树栖蚂蚁诱集陷阱, 使用金枪鱼和蜂蜜混合物作为诱饵提高诱集效果, 共 15 个样本; 枯落物层: 在距离地表陷阱 5 m 处选择 1 m×1 m 未被踩踏过的样方, 收集样方内的枯落物及 3 cm 表土过筛(1 cm 孔径)后投入 Winkler 袋中收集蚂蚁 72 h, 每个样地 15 个样本。每个地表陷阱和树栖蚂蚁诱集陷阱内倒入 50 mL 乙二醇(50%)作为陷阱液, 放置 48 h 后收集陷阱中的蚂蚁, 所有标本置于含有 75%酒精的离心管中带回实验室。所收集到的蚂蚁根据相关资料鉴定到种, 不能鉴定到种的, 按形态种对待[18–20]。

参考 Andersen[13–14]基于全球尺度蚂蚁属级水平上的竞争关系、生境要求和行为优势以及对环境压力及干扰的响应的功能群划分方法, 以调查到的蚂蚁数据为基础, 查询蚂蚁相关书籍及网站(AntWeb、AntWiki 及 AntCat), 获取调查中出现的蚂蚁生态学资料, 在蚂蚁属级水平上依据竞争关系、生境要求、行为优势以及对环境压力及干扰的响应 4 个生态学角度划分本研究的蚂蚁功能群, 共划分为 7 个功能群(表 1)。

表 1　不同蚂蚁功能群划分特点

Table 1　Characters of different functional groups of ant

功能群 Functional group	竞争和行为优势 Competition and behavioral dominance	生境要求 Habitats require	对环境变化和干扰的响应 Responses to habitats change and disturbance
优势臭蚁亚科 Dominant Dolichoderinae (DD)	种群较大, 活动能力强, 竞争能力强, 行为优势强 Abundant, highly active and competition with strong behavioral dominance	喜欢开放有干扰生境 Favor open habitats with disturbance	响应强, 与干扰程度正相关 Strong responses and positive correlation with disturbance
广义切叶蚁亚科 Generalised Myrmicinae (GM)	竞争能力中等, 无行为优势 Moderate competition without behavioral dominance	对生境无特殊要求 Non-habitat requirements	响应中等 Moderate responses
从属弓背蚁族 Subordinate Camponotini (SC)	体型大活动能力强, 竞争能力中等, 行为上受优势类群制约 Large body size, highly active and moderate competition, behaviorally submissive to dominant dolichoderinae	喜欢开放有干扰生境 Favor open habitats with disturbance	响应中等 Moderate responses
气候特化种 Climate Specialists (CS)	竞争能力中等 Moderate competition	严格的生境要求 Strictly habitat requirements	响应强, 与干扰程度负相关 Strong responses and negative correlation with disturbance
机会主义者 Opportunities (O)	竞争能力弱 Weak competition	生境要求较弱 Not strictly habitat requirements	响应中等 Moderate responses
隐蔽物种 Cryptic Species (C)	体型小、种群小、竞争能力弱, 无行为优势 Small body size and population, weak competition without behavioral dominance	在枯落物或地下活动, 对生境要求严格 Living in leaf-litter or underground, strictly habitat requirements	响应强, 与干扰负相关 Strong responses and negative correlation with disturbance
专业捕食者 Specialist Predators (SP)	体型大, 种群小, 活动能力强, 具有较强的捕食能力 Large body size, small population, highly active and predation	无特殊生境要求 Non-habitat requirements	响应弱 Weak responses

1.3 数据分析

1.3.1 生境变化对蚂蚁功能群的影响

以不同功能群在不同类型样地中的多度百分率柱状图来揭示土地利用变化对蚂蚁功能群的影响。分析前对蚂蚁个体数进行 6 级评分转换，即 1 头记 1，2~5 头记 2，6~10 头记 3，11~20 头记 4，21~50 头记 5，>50 头记 6，防止抽样时处于蚁巢附近或蚂蚁觅食路径上的样本多度偏高[17]。使用评分后的多度数据计算不同样地各功能群组成比例，并绘制柱状图。在属级水平上进行蚂蚁群落结构非度量多维标度(NMDS，Non-metric Multidimensional Scaling)排序，排序前数据进行标准化处理，软件计算获得胁强系数，以此判断排序图的解释效果，当胁强系数小于 0.1 时表示排序结果具有较好代表性。使用群落相似性分析 ANOSIM(Analysis of Similarities)方法检验群落结构差异的显著性，使用统计分析软件 PRIMER v7 完成上述分析[21]。

1.3.2 生境变化对蚂蚁不同功能群组成的影响

对不同功能群转换后的蚂蚁多度数据进行主坐标分析(PCO，principal coordinate analysis)，以线条表示物种，绘制物种与样地的关系图，在 50%相似性水平上比较蚂蚁群落结构，使用 PRIMER v7 中的 PERMANOVA+进行主坐标排序图的分析与绘制，分析前蚂蚁多度数据进行标准化处理[21]。

2 结果与分析

2.1 生境变化对蚂蚁功能群组成及结构的影响

试验共采集蚂蚁 37 891 头，隶属于 8 亚科 52 属 137 种，将 52 属蚂蚁划分为 7 个功能群(表 2)。蚂蚁功能群按物种数由高到低排序为机会主义者(10 属 32 种)>气候特化种(15 属 29 种)>广义切叶蚁亚科(3 属 24 种)>隐蔽物种(14 属 21 种)>从属弓背蚁族(2 属 16 种)>专业捕食者(6 属 14 种)>优势臭蚁亚科(2 属 2 种)。大部分功能群的蚂蚁多度在天然次生林、桉树林和紫胶林中较高，如姬猛蚁属(*Hypoponera*)、隆头蚁属(*Strumigenys*)、棒切叶蚁属(*Rhoptromyrmex*)、拟毛蚁属(*Pseudolasius*)、织叶蚁属(*Oecophylla*)、铺道蚁属(*Tetramorium*)等，小家蚁属(*Monomorium)*和弓背蚁属(*Camponotus*)蚂蚁在紫胶林和紫胶–玉米混农林中多度较高，而虹臭蚁属(*Iridomyrmex*)蚂蚁则在旱地和农田中多度较高(表 2)。

表 2 不同生境蚂蚁功能群物种数及多度

Table 2 Ant species richness and abundance of functional groups among different habitats

属 Genus	功能群 Functional group	物种数 Species number	多度 Abundance						
			N	E	L	R	M	D	F
姬猛蚁属 *Hypoponera*	隐蔽物种 Cryptic Species	3	72	30	51	2	2		
尖尾蚁属 *Acropyga*	隐蔽物种 Cryptic Species	1	5	1					
盲切叶蚁属 *Carebara*	隐蔽物种 Cryptic Species	1		2	1		1		
稀切叶蚁属 *Oligomyrmex*	隐蔽物种 Cryptic Species	1	15	39	50	2	13	1	
细蚁属 *Leptanilla*	隐蔽物种 Cryptic Species	1				2			
埃猛蚁属 *Emeryopone*	隐蔽物种 Cryptic Species	1				1			
锯猛蚁属 *Prionopelta*	隐蔽物种 Cryptic Species	1			2		1		
隆头蚁属 *Strumigenys*	隐蔽物种 Cryptic Species	2	19	23	33	1	1		
塔蚁属 *Pyramica*	隐蔽物种 Cryptic Species	2	1	5	12				
圆鳞蚁属 *Epitritus*	隐蔽物种 Cryptic Species	1		1					
角腹蚁属 *Recurvidris*	隐蔽物种 Cryptic Species	2	19	73	73	2	62	37	
巨首蚁属 *Pheidologeton*	隐蔽物种 Cryptic Species	1	57	25	89	14	33	34	
隐猛蚁属 *Cryptopone*	隐蔽物种 Cryptic Species	1						1	
斜结蚁属 *Plagiolepis*	隐蔽物种 Cryptic Species	3	7	29	30	1	56	61	1
臭蚁属 *Dolichoderus*	气候特化种 Climate Specialists	5	78	10	22	6	224	1	3
举腹蚁属 *Crematogaster*	气候特化种 Climate Specialists	9	33		43	16			
盾胸蚁属 *Meranoplus*	气候特化种 Climate Specialists	1	3						
沟切叶蚁属 *Cataulacus*	气候特化种 Climate Specialists	1	6		8		5		
平结蚁属 *Prenolepis*	气候特化种 Climate Specialists	1					1		
细长蚁属 *Tetraponera*	气候特化种 Climate Specialists	4	12	4	21	25	18		
棒角蚁属 *Rhopalomastix*	气候特化种 Climate Specialists	1		1					
棒切叶蚁属 *Rhoptromyrmex*	气候特化种 Climate Specialists	1	27	94	33	15	6	5	
扁胸蚁属 *Vollenhovia*	气候特化种 Climate Specialists	1	21	1					

续表

属 Genus	功能群 Functional group	物种数 Species number	多度 Abundance						
			N	E	L	R	M	D	F
棱胸蚁属 *Pristomyrmex*	气候特化种 Climate Specialists	2	3		2	3		1	
光结蚁属 *Anoplolepis*	气候特化种 Climate Specialists	1				11			
拟毛蚁属 *Pseudolasius*	气候特化种 Climate Specialists	3	24	40	15		4	1	
曲颊猛蚁属 *Gnamptogenys*	气候特化种 Climate Specialists	1	17		39	7	105	16	
无刺蚁属 *Kartidris*	气候特化种 Climate Specialists	1			1				
盲蚁属 *Aenictus*	气候特化种 Climate Specialists	4	3		5	1	1		
菲臭蚁属 *Philidris*	优势臭蚁亚科 Dominant Dolichoderinae	1					8		
虹臭蚁属 *Iridomyrmex*	优势臭蚁亚科 Dominant Dolichoderinae	1	4	5				21	103
织叶蚁属 *Oecophylla*	广义切叶蚁亚科 Generalised Myrmicinae	1	154	340	232	6	40		
大头蚁属 *Pheidole*	广义切叶蚁亚科 Generalised Myrmicinae	10	164	219	245	111	462	374	56
小家蚁属 *Monomorium*	广义切叶蚁亚科 Generalised Myrmicinae	5	51	46	190	24	246	47	6
大齿猛蚁属 *Odontomachus*	机会主义者 Opportunities	2	2			2			
凹臭蚁属 *Ochetellus*	机会主义者 Opportunities	1			3		2		
刺结蚁属 *Lepisiota*	机会主义者 Opportunities	3	23	10	83		120	12	
狡臭蚁属 *Technomyrmex*	机会主义者 Opportunities	3	14	22	69	8	10		
立毛蚁属 *Paratrechina*	机会主义者 Opportunities	6	7	13	21	9	28	13	15
盘腹蚁属 *Aphaenogaster*	机会主义者 Opportunities	4	92	29	36	17	4		
铺道蚁属 *Tetramorium*	机会主义者 Opportunities	8	209	37	56		3	2	
双刺猛蚁属 *Diacamma*	机会主义者 Opportunities	1				4			
酸臭蚁属 *Tapinoma*	机会主义者 Opportunities	2	17	30	77	18	47	37	
心结蚁属 *Cardiocondyla*	机会主义者 Opportunities	2	9	28	31	4	66	9	85
多刺蚁属 *Polyrhachis*	从属弓背蚁族 Subordinate Camponotini	8	26	12	37	2	25		
弓背蚁属 *Camponotus*	从属弓背蚁族 Subordinate Camponotini	8	112	42	288	15	282	46	17
齿猛蚁属 *Odontoponera*	专业捕食者 Specialist Predators	1	52	46	30	15	88	56	7
镰猛蚁属 *Harpegnathos*	专业捕食者 Specialist Predators	1					1		2
钩猛蚁属 *Anochetus*	专业捕食者 Specialist Predators	3	1	9	10	3			
厚结猛蚁属 *Pachycondyla*	专业捕食者 Specialist Predators	6	108	66	83	10	50	25	2
细颚猛蚁属 *Leptogenys*	专业捕食者 Specialist Predators	2			4		4	2	
长齿蚁属 *Myrmoteras*	专业捕食者 Specialist Predators	1	3						

N：天然次生林；E：桉树林；L：紫胶林；R：橡胶林；M：紫胶–玉米混农林；D：旱地；F：农田。下同。N: secondary natural forest; E: eucalyptus plantation; L: lac plantation; R: rubber plantation; M: lac-corn agroforest; D: dry land; F: farmland. The same below.

不同功能群在不同生境类型中蚂蚁物种丰富度有变化，除优势臭蚁亚科仅 2 属 2 种外，大多数功能群在天然次生林、桉树林、紫胶林和紫胶–玉米混农林中的蚂蚁物种丰富度明显高于农田，而专业捕食者功能群蚂蚁物种丰富度在各生境中差异不大(表 3)。隐蔽物种功能群蚂蚁在桉树林中物种数最多，气候特化种功能群蚂蚁在天然次生林和紫胶林中物种数较多，广义切叶蚁亚科功能群蚂蚁在天然次生林、桉树林和橡胶林中物种数较多，机会主义者功能群在天然次生林和紫胶林中物种数较多，从属弓背蚁族功能群蚂蚁在紫胶林中物种数最多，专业捕食者在天然次生林中物种数最多，但各生境物种数差异较小(表 3)。

生境变化对不同样地蚂蚁功能群组成比例的影响不同(图 1)。广义切叶蚁亚科在所有样地中均占较高比例(20%~50%)，其中桉树林、橡胶林和旱地中的比例较高，农田最低，混农林、紫胶林和天然次生林处于中间水平；气候特化种在各样地中比例占 20%以下，其中橡胶林和混农林气候特化种的比例相对较高，天然次生林、紫胶林和桉树林次之，这些样地均明显高于农田和旱地；机会主义者在农田中的比例最高，天然次生林次之，其余样地则较为接近(约

表 3 不同生境不同功能群蚂蚁物种丰富度

Table 3 Ant species richness of different ant functional groups in different habitats

功能群 Functional group	N	E	L	R	M	D	F
优势臭蚁亚科 Dominant Dolichoderinae (DD)	1	1	0	0	1	1	1
广义切叶蚁亚科 Generalised Myrmicinae (GM)	19	18	14	18	14	11	9
从属弓背蚁族 Subordinate Camponotini (SC)	10	7	12	6	10	2	2
气候特化种 Climate Specialists (CS)	15	11	14	11	11	5	2
机会主义者 Opportunities (O)	22	19	21	17	16	11	3
隐蔽物种 Cryptic Species (C)	10	14	12	8	10	6	1
专业捕食者 Specialist Predators (SP)	9	6	6	7	6	5	4



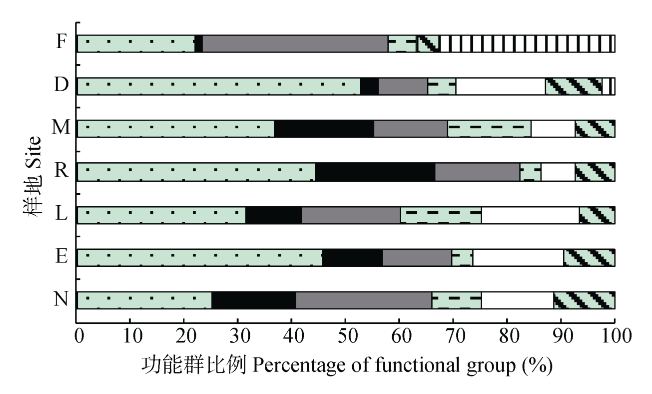


图 1 不同生境中蚂蚁不同功能群组成比例

Fig. 1 Composition of different ant functional groups in different habitats

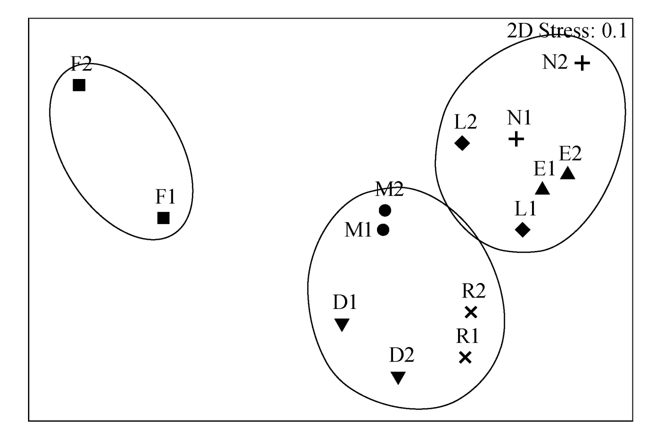


图 2 基于功能群的不同生境蚂蚁群落结构非度量多维标度(NMDS)排序

Fig. 2 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) ordination of ant communities based on functional groups in different habitats

字母后数字为样地重复，图中实线圈表示50%相似性水平。Numbers after the names of habitats were replicates of samples. Solid circle denotes similarities at 50% level.

为 15%); 从属弓背蚁族在混农林和紫胶林中比例较高，天然次生林次之，其余样地比例较低；隐蔽物种在紫胶林、桉树林、天然次生林和旱地中比例较高，混农林和橡胶林次之，农田中无隐蔽物种；专业捕食者除在农田中的比例较低外，其余类型样地的比例变化不大；优势臭蚁亚科仅出现在农田和旱地中，且高干扰的农田中的比例达 30%。

生境变化对蚂蚁功能群的群落结构产生影响，不同类型样地的蚂蚁功能群内群落结构有显著差异(ANOSIM Global, R=0.935, P=0.001)，胁强系数(2D stress)=0.1。其中，桉树林和紫胶林蚂蚁功能群的群落结构与天然次生林较为接近(50%相似性水平)；橡胶林、紫胶–玉米混农林和旱地蚂蚁功能群的群落结构相似；整体上，农田的蚂蚁功能群内群落结构与其余 6 种类型样地不相似(50%相似性水平)(图 2)。

2.2 生境变化对蚂蚁不同功能群内物种的影响

功能群变化能够反映出生境变化，生境类型变化导致不同功能群蚂蚁群落变化的程度大于同一生境重复样地间的蚂蚁群落变化程度。所有类型生境间的专业捕食者功能群蚂蚁群落无明显差异(图 3f)，大部分生境类型间隐蔽物种功能群的蚂蚁群落差异小于同种类型样地重复的差异(图 3a)，其他 4 个功能群在绝大部分生境类型中的差异则大于同种生境类型重复样地间的差异(图 3b, 3c, 3d 和 3e)。

生境变化对隐蔽物种功能群内群落组成影响较小(图 3a)，该功能群在桉树林和紫胶林蚂蚁群落结构较为相似，女娲角腹蚁(*Recurvidris nuwa*)、高结稀切叶蚁(*Oligomyrmex altinodus*)、阿禄斜结蚁(*Plagiolepis alluaudi*)和邻姬猛蚁(*Hypoponera confinis*)与这两种样地关联性高(Spearman 相关系数>0.5)，在其余样地中则表现为混杂无明显规律。

生境变化对气候特化种功能群内群落组成影响较小(图 3b)，该功能群在不同类型样地间的蚂蚁群

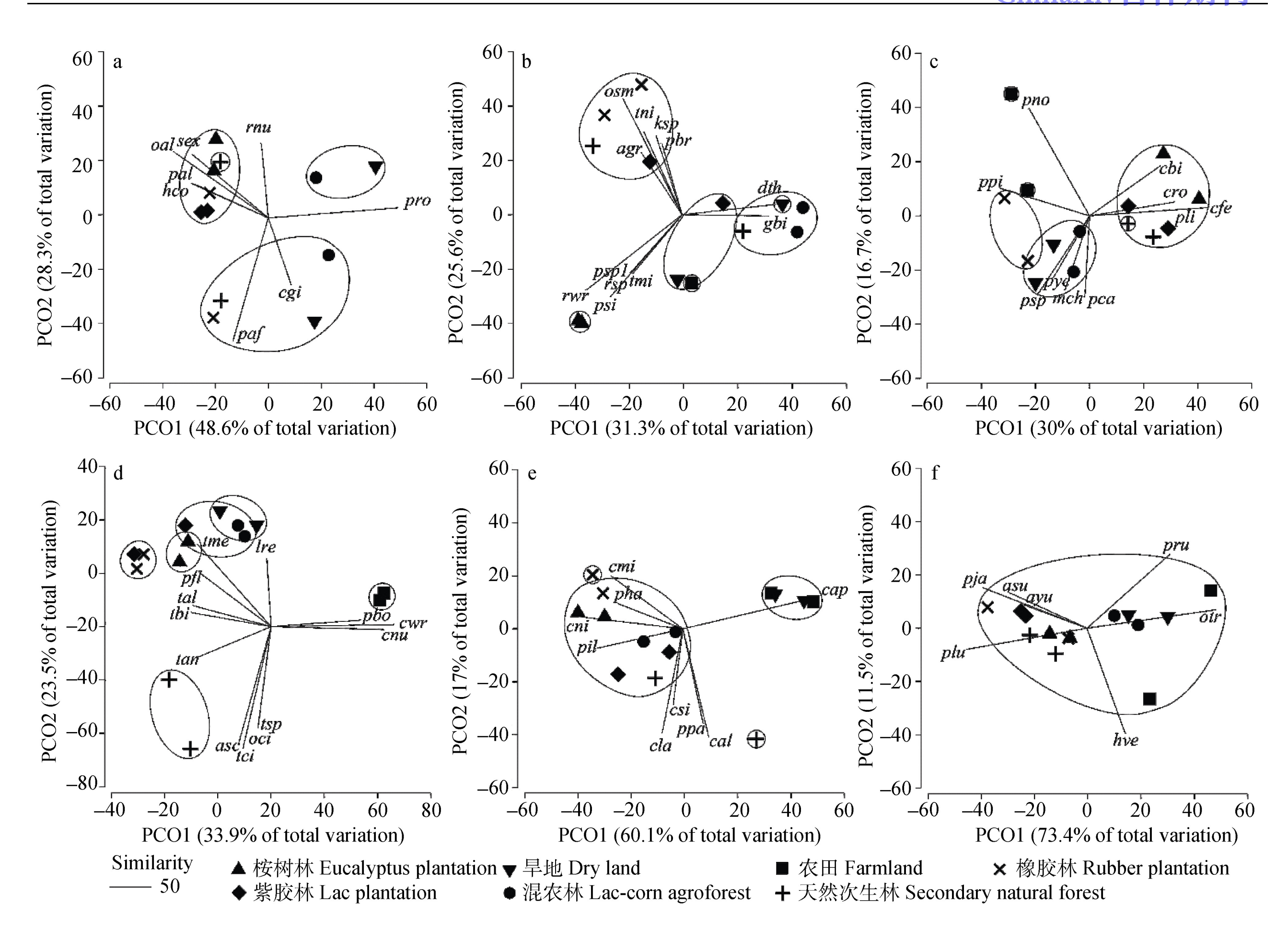


图 3　不同生境中蚂蚁功能群隐蔽物种(a)、气候特化种(b)、广义切叶蚁亚科(c)、机会主义者(d)、从属弓背蚁族(e)和专业捕食者(f)的主坐标分析

Fig. 3　Principal coordinates analysis of Cryptic Species (a), Climate Specialists (b), Generalised Myrmicinae (c), Opportunities (d), Subordinate Camponotini (e) and Specialist Predators (f) in different habitats

图中仅列出了 Spearman 相关系数>0.5 的物种。*pal*: 阿禄斜结蚁; *cgi*: 大隐猛蚁; *oal*: 高结稀切叶蚁; *hco*: 邻姬猛蚁; *paf*: 邻巨首蚁; *pro*: 罗思尼斜结蚁; *rnu*: 女娲角腹蚁; *sex*: 长隆头蚁; *rsp*: 棒角蚁属 sp.1; *pbr*: 短刺棱胸蚁; *dth*: 黑可可臭蚁; *tni*: 黑细长蚁; *osm*: 黄猄蚁; *rwr*: 罗氏棒切叶蚁; *psp1*: 拟毛蚁属 sp.1; *tmi*: 榕细长蚁; *ksp*: 疏毛无刺蚁; *gbi*: 双色曲颊猛蚁; *psi*: 西氏拟毛蚁; *agr*: 长足光结蚁; *psp*: 棒刺大头蚁; *cbi*: 比罗举腹蚁; *cro*: 黑褐举腹蚁; *pca*: 卡泼林大头蚁; *pli*: 来氏大头蚁; *cfe*: 立毛举腹蚁; *pno*: 菱结大头蚁; *ppi*: 皮氏大头蚁; *pye*: 伊大头蚁; *mch*: 中华小家蚁; *tal*: 白足狡臭蚁; *pbo*: 布立毛蚁; *tbi*: 二色狡臭蚁; *tme*: 黑头酸臭蚁; *oci*: 环纹大齿猛蚁; *pfl*: 黄足立毛蚁; *cwr*: 罗氏心结蚁; *cnu*: 裸心结蚁; *tci*: 毛发铺道蚁; *tsp*: 铺道蚁属 sp.1; *asc*: 舒尔盘腹蚁; *lre*: 网纹刺结蚁; *tan*: 长角狡臭蚁; *cpa*: 巴瑞弓背蚁; *pha*: 哈氏多刺蚁; *csi*: 红头弓背蚁; *cal*: 黄斑弓背蚁; *cla*: 毛钳弓背蚁; *cni*: 尼科巴弓背蚁; *ppa*: 拟弓多刺蚁; *cmi*: 平和弓背蚁; *pil*: 伊劳多刺蚁; *otr*: 横纹齿猛蚁; *pru*: 红足厚结猛蚁; *plu*: 黄足厚结猛; *hve*: 猎镰猛蚁; *asu*: 小眼钩猛蚁; *ayu*: 云南钩猛蚁; *pja*: 爪哇厚结猛蚁。Results only showed species with Spearman index greater than 0.5. *pal*: *lagiolepis alluaudi*; *cgi*: *Cryptopone gigas*; *oal*: *Oligomyrmex altinodus*; hco: *Hypoponera confinis*; *paf*: *Pheidologeton affinis*; *pro*: *Plagiolepis rothneyi*; *rnu*: *Recurvidris nuwa*; *sex*: *Strumigenys exilirhina*; *rsp*: *Rhopalomastix* sp.1; *pbr*: *Pristomyrmex brevispinosus*; *dth*: *Dolichoderus thoracicus*; *tni*: *Tetraponera nigra*; *osm*: *Oecophylla smaragdina*; *rwr*: *Rhoptromyrmex wroughtonii*; *psp1*: *Pseudolasius* sp.1; *tmi*: *Tetraponera microcarpa*; *ksp*: *Kartidris sparsipila*; *gbi*: *Gnamptogenys bicolor*; *psi*: *Pseudolasius silvestrii*; *agr*: *Anoplolepis gracilipes*; *psp*: *Pheidole spathifera*; *cbi*: *Crematogaster biroi*; *cro*: *Crematogaster rogenhoferi*; *pca*: *Pheidole capellini*; *pli*: *Pheidole lighti*; *cfe*: *Crematogaster ferrarii*; *pno*: *Pheidole noda*; *ppi*: *Pheidole pieli*; *pye*: *Pheidole yeensis*; *mch*: *Monomorium chinensis*; *tal*: *Technomyrmex albipes*; *pbo*: *Paratrechina bourbonica*; *tbi*: *Technomyrmex bicolor*; *tme*: *Tapinoma melanocephalum*; *oci*: *Odontomachus circulus*; *pfl*: *Paratrechina flavipes*; *cwr*: *Cardiocondyla wroughtonii*; *cnu*: *Cardiocondyla nuda*; *tci*: *Tetramorium ciliatum*; *tsp*: *Tetramorium* sp.1; *asc*: *Aphaenogaster schurri*; *lre*: *Lepisiota reticulate*; *tan*: *Technomyrmex antennus*; *cpa*: *Camponotus parius*; *pha*: *Polyrhachis halidayi*; *csi*: *Camponotus singularis*; *cal*: *Camponotus albosparsus*; *cla*: *Camponotus lasiselene*; *cni*: *Camponotus nicobarensis*; *ppa*: *Polyrhachis paracamponota*; *cmi*: *Camponotus mitis*; *pil*: *Polyrhachis illaudata*; *otr*: *Odontoponera transversa*; *pru*: *Pachycondyla rufipes*; *plu*: *Pachycondyla luteipes*; *hve*: *Harpegnathos venator*; *asu*: *Anochetus subcoecus*; *ayu*: *Anochetus yunnanensis*; *pja*: *Pachycondyla javana*.

落结构相似性无明显规律，桉树林与其余类型的群落结构不相似，罗氏棒切叶蚁(*Rhoptromyrmex wroughtonii*)和西氏拟毛蚁(*Pseudolasius silvestrii*)与该样地关联性高(Spearman 相关系数>0.5)。

生境变化对广义切叶蚁亚科功能群内群落组成影响较大(图 3c)。该功能群在桉树林、紫胶林和天然次生林内的群落结构较为相似，其中比罗举腹蚁(*Crematogaster biroi*)、黑褐举腹蚁(*C. rogenhoferi*)、

立毛举腹蚁(*C. ferrarii*)和来氏大头蚁(*Pheidole lighti*)与上述样地关联性高(Spearman 相关系数>0.5); 该功能群在紫胶–玉米混农林和旱地 2 内的群落结构较为相似, 其中伊大头蚁(*P. yeensis*)、棒刺大头蚁(*P. spathifera*)、卡泼林大头蚁(*P. capellini*)和中华小家蚁(*Monomorium chinensis*)与这 2 个样地关联性高(Spearman 相关系数>0.5); 菱结大头蚁(*P. noda*)只与农田 1 关联性高(Spearman 相关系数>0.5)。

生境变化对机会主义者功能群内群落组成影响较大(图 3d)。该功能群在紫胶林、桉树林、橡胶林和紫胶–玉米混农林蚂蚁群落结构较为相似, 其中黑头酸臭蚁(*Tapinoma melanocephalum*)、黄足立毛蚁(*Paratrechina flavipes*)和网纹刺结蚁(*Lepisiota reticulate*)与上述样地关联性高(Spearman 相关系数>0.5); 布立毛蚁(*P. bourbonica*)、罗氏心结蚁(*Cardiocondyla wroughtonii*)和裸心结蚁(*C. nuda*)与农田的关联性较高(Spearman 相关系数>0.5); 长角狡臭蚁(*Technomyrmex antennus*)、环纹大齿猛蚁(*Odontomachus circulus*)、舒尔盘腹蚁(*Aphaenogaster schurri*)和毛发铺道蚁(*Tetramorium ciliatum*)与天然次生林关联性较高(Spearman 相关系数>0.5)。

生境变化对从属弓背蚁族功能群内群落组成影响较大(图 3e)。该功能群在紫胶林、紫胶–玉米混农林与天然次生林 2 内的群落结构较为相似, 其中毛钳弓背蚁(*Camponotus lasiselene*)、红头弓背蚁(*C. singularis*)、黄斑弓背蚁(*C. albosparsus*)和拟弓多刺蚁(*Polyrhachis paracamponota*)与上述样地关联性高(Spearman 相关系数>0.5); 该功能群在桉树林、紫胶–玉米混农林与橡胶林蚂蚁群落结构较为相似, 其中尼科巴弓背蚁(*C. nicobarensis*)、平和弓背蚁(*C. mitis*)和哈氏多刺蚁(*P. halidayi*)与上述样地关联性高(Spearman 相关系数>0.5); 巴瑞弓背蚁(*C. parius*)与旱地和农田的关联性较高(Spearman 相关系数>0.5)。

生境变化对专业捕食者功能群内群落组成影响较小(图 3f), 整体上, 该功能群在 7 种类型样地群落结构分为两大类, 其中, 在天然次生林、桉树林、紫胶林和橡胶林中为一类, 黄足厚结猛蚁(*Pachycondyla luteipes*)、云南钩猛蚁(*Anochetus yunnanensis*)、小眼钩猛蚁(*A. subcoecus*)和爪哇厚结猛蚁(*Pachycondyla javana*)与上述样地关联性高(Spearman 相关系数>0.5); 在紫胶–玉米混农林、旱地和农田中为一类, 横纹齿猛蚁(*Odontoponera transversa*)和红足厚结猛蚁(*P. rufipes*)与上述样地关联性高(Spearman 相关系数>0.5)。

3 讨论与结论

在局域尺度下, 蚂蚁功能群可以指示土地利用变化, 实质上是不同功能群中的物种组成及群落结构随着环境变化而发生了改变。本研究结果显示, 蚂蚁功能群能够揭示植被类型变化对蚂蚁群落的影响, 生境变化对广义切叶蚁亚科、从属弓背蚁族和机会主义者 3 个功能群影响较大, 其蚂蚁物种组成(表 2)及群落结构在不同类型样地中明显不同, 与各类型样地相关联的物种也具有不同的生态学特点, 这些功能群指示生境变化和栖境变化的效果较好。在不同生境中, 隐蔽物种、气候特化种及专业捕食者功能群蚂蚁物种组成虽然不同, 但蚂蚁群落结构无差异。此外, 从属弓背蚁族、气候特化种、隐蔽物种 3 个功能群的蚂蚁多度在干扰少的样地中所占比例较高, 优势臭蚁亚科功能群仅在干扰多的样地出现, 表明优势臭蚁亚科、隐蔽物种、专业捕食者和气候特化种在不同生境中指示生境变化的作用相对较弱。

蚂蚁功能群之所以能够指示生境变化, 是因为不同蚂蚁功能群对干扰及资源可利用程度的差异有响应[22–23]。优势臭蚁亚科功能群被认为主要发生在栖境开放、植被结构简单的环境中, 同时, 这一功能群表现为较大的种群数量、高活动能力并具有行为优势[13]。本研究中, 该功能群仅在旱地和农田中出现, 且多度所占的比例较少, 说明农田和旱地栖境结构简单, 可利用的资源量十分有限。在优势臭蚁亚科缺少的温暖栖境中, 广义切叶蚁亚科表现为蚂蚁物种最丰富的功能群, 如在南非热带萨王纳区域[24]以及世界上大多数的雨林中[25]。本研究中人工林及天然次生林中广义切叶蚁亚科功能群占较大比例, 而该区域属于亚热带季风气候区, 说明人工林具备一定森林特性。机会主义者功能群是非特化的物种, 其行为受到其他蚂蚁类群影响, 在可用资源量较少或干扰严重影响到蚂蚁的繁殖率及多样性时才会表现为优势类群[14]。本研究中机会主义者在人工林中未表现较强的行为优势, 表明这些人工林干扰较少, 能够为蚂蚁提供生存所需要的资源。此外, 从属弓背蚁族功能群的竞争能力较弱, 其行为受到优势蚂蚁类群的制约[14]。本研究中该功能群在人工林中也有较高比例, 说明该类型样地栖境有一定的异质性, 资源较丰富, 能提供竞争能力弱的功能群一定的生态位。

不同功能群对不同环境条件的响应不一致，导致它们具有不同的生物指示效果[26–28]。本研究中广义切叶蚁亚科、从属弓背蚁族和机会主义者 3 个功能群对生境变化的响应效果(物种组成及群落结构变化)要好于气候特化种、隐蔽物种和专业捕食者 3 个功能群，可能原因是前 3 个功能群的蚂蚁对生境要求较弱，常在地下筑巢，这些类群在不同土地类型中均有分布，其多度随着不同土地利用程度差异而发生变化，具有较为直观的指示效果；后 3 种类型功能群对生境要求较高，其生存需要依赖一定的栖境条件，如树栖种类、生活在枯落物层中的种类以及捕食性的特化种类，栖境中缺乏相应的条件就没有这些功能群分布，因此表现为较弱的指示效果。本研究通过局域尺度上蚂蚁功能对生境变化的响应，揭示了蚂蚁功能群的生物指示作用，不同蚂蚁功能群的指示作用效果有差异；目前，我国在大尺度上对蚂蚁功能群的运用研究还较少，其生物指示价值在今后生物指示研究中的运用值得深入探讨。

致谢　西南林业大学徐正会教授帮助核实标本，谨表谢意！

参考文献 References

[1] Turner B L, Skole D, Sanderson S, et al. Land-use and land-cover change. Science/research plan[R]. IGBP Report No. 35 and IHDP Report No. 7, IGBP of the ICSU and HDP of the ISSC. Stockholm and Geneva: IGBP, 1995

[2] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309(5734): 570–574

[3] 胡庭兴. 西南山地森林生态系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 10–102
Hu T X. Study on Montane Forest Ecosystems Southwest China[M]. Beijing: Science Press, 2011: 10–102

[4] Chen Y Q, Li Q, Chen Y L, et al. Lac-production, arthropod biodiversity and abundance, and pesticide use in Yunnan Province, China[J]. Tropical Ecology, 2010, 51(2): 255–263

[5] Chen Y Q, Li Q, Chen Y L, et al. Ant diversity and bio-indicators in land management of lac insect agroecosystem in southwestern China[J]. Biodiversity and Conservation, 2011, 20(13): 3017–3038

[6] Mantyka-Pringle C S, Martin T G, Rhodes J R. Interactions between climate and habitat loss effects on biodiversity: A systematic review and meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2012, 18(4): 1239–1252

[7] Tawatao N, Lucey J M, Senior M, et al. Biodiversity of leaf-litter ants in fragmented tropical rainforests of Borneo: The value of publically and privately managed forest fragments[J]. Biodiversity and Conservation, 2014, 23(12): 3113–3126

[8] Brown P H, Miller D M, Brewster C C, et al. Biodiversity of ant species along a disturbance gradient in residential environments of Puerto Rico[J]. Urban Ecosystems, 2013, 16(2): 175–192

[9] Gillette P N, Ennis K K, Domínguez Martínez G, et al. Changes in species richness, abundance, and composition of arboreal twig-nesting ants along an elevational gradient in coffee landscapes[J]. Biotropica, 2015, 47(6): 712–722

[10] Parr C L, Gray E F, Bond W J. Cascading biodiversity and functional consequences of a global change-induced biome switch[J]. Diversity and Distributions, 2012, 18(5): 493–503

[11] Edwards D P, Tobias J A, Sheil D, et al. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2014, 29(9): 511–520

[12] Greenslade P J M. Ants[M]//Low W A. The Physical and Biological Features of Kunoth Paddock in Central Australia. East Melbourne, Victoria: Commonwealth Scientific and Industrial Organization, 1978: 109–113

[13] Andersen A N. A classification of Australian ant communities, based on functional groups which parallel plant life-forms in relation to stress and disturbance[J]. Journal of Biogeography, 1995, 22(1): 15–29

[14] Andersen A N. Functional groups and patterns of organization in North American ant communities: A comparison with Australia[J]. Journal of Biogeography, 1997, 24(4): 433–460

[15] King J R, Andersen A N, Cutter A D. Ants as bioindicators of habitat disturbance: Validation of the functional group model for Australia's humid tropics[J]. Biodiversity & Conservation, 1998, 7(12): 1627–1638

[16] Bisevac L, Majer J D. Comparative study of ant communities of rehabilitated mineral sand mines and heathland, western Australia[J]. Restoration Ecology, 1999, 7(2): 117–126

[17] Hoffmann B D, Andersen A N. Responses of ants to disturbance in Australia, with particular reference to functional groups[J]. Austral Ecology, 2003, 28(4): 444–464

[18] 吴坚，王常禄. 中国蚂蚁[M]. 北京：中国林业出版社，1995
Wu J, Wang C L. The Ants of China[M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 1995

[19] 徐正会. 西双版纳自然保护区蚁科昆虫生物多样性研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2002
Xu Z H. A Study on the Biodiversity of Formicidae Ants of Xishuangbanna Nature Reserve[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2002

[20] 李巧，陈又清，徐正会. 蚂蚁群落研究方法[J]. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1862–1870
Li Q, Chen Y Q, Xu Z H. Research methods on ant community[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(9): 1862–1870

[21] Clarke K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure[J]. Australian Journal of Ecology, 1993, 18(1): 117–143

[22] Hoffmann B D. Responses of ant communities to experimental fire regimes on rangelands in the Victoria river

district of the Northern Territory[J]. Austral Ecology, 2003, 28(2): 182–195
[23] van Ingen L T, Campos R I, Andersen A N. Ant community structure along an extended rain forest-savanna gradient in tropical Australia[J]. Journal of Tropical Ecology, 2008, 24(4): 445–455
[24] Parr C L, Robertson H G, Biggs H C, et al. Response of African savanna ants to long-term fire regimes[J]. Journal of Applied Ecology, 2004, 41(4): 630–642
[25] Ward P S. Taxonomy, phylogenetics, and evolution[M]//Lach L, Parr C L, Abott K L. Ant Ecology. Oxford: Oxford University Press, 2010: 1
[26] Andersen A N, Houadria M, Berman M, et al. Rainforest ants of the Tiwi Islands: A remarkable centre of endemism in Australia's monsoonal tropics[J]. Insectes Sociaux, 2012, 59(3): 433–441
[27] Bernadou A, Céréghino R, Barcet H, et al. Physical and land-cover variables influence ant functional groups and species diversity along elevational gradients[J]. Landscape Ecology, 2013, 28(7): 1387–1400
[28] Moranz R A, Debinski D M, Winkler L, et al. Effects of grassland management practices on ant functional groups in central North America[J]. Journal of Insect Conservation, 2013, 17(4): 699–713